

## MODELOS NUMERICOS EN LA CONSTRUCCION DE LOS TUNELES DE "EL PADRUN"



Enrique Alarcón Álvarez. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Licenciado en Ciencias Físicas. Director del Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales de la ETSIIM

**L**a construcción de los túneles de El Padrún constituye un hito en la realización de obras subterráneas en España. Su ejecución se ha caracterizado por la utilización de la más reciente tecnología.

La aplicación del llamado Nuevo Método Austriaco de Construcción de túneles (NATM) como base del proyecto se ha llevado a cabo con rigor en todos sus extremos.

De acuerdo a esta filosofía, el trabajo de la Asistencia Técnica se ha centrado en una doble línea: el control instrumental sistemático de la obra, y la interpretación de los datos recogidos mediante modelos de análisis numérico.

El primer objetivo se ha cubierto mediante un ambicioso plan de instrumentación. En él se han incluido medidas para la caracterización del sistema terreno-sostenimiento. La información se ha mantenido centralizada en una base de datos dispuesta a pie de obra.

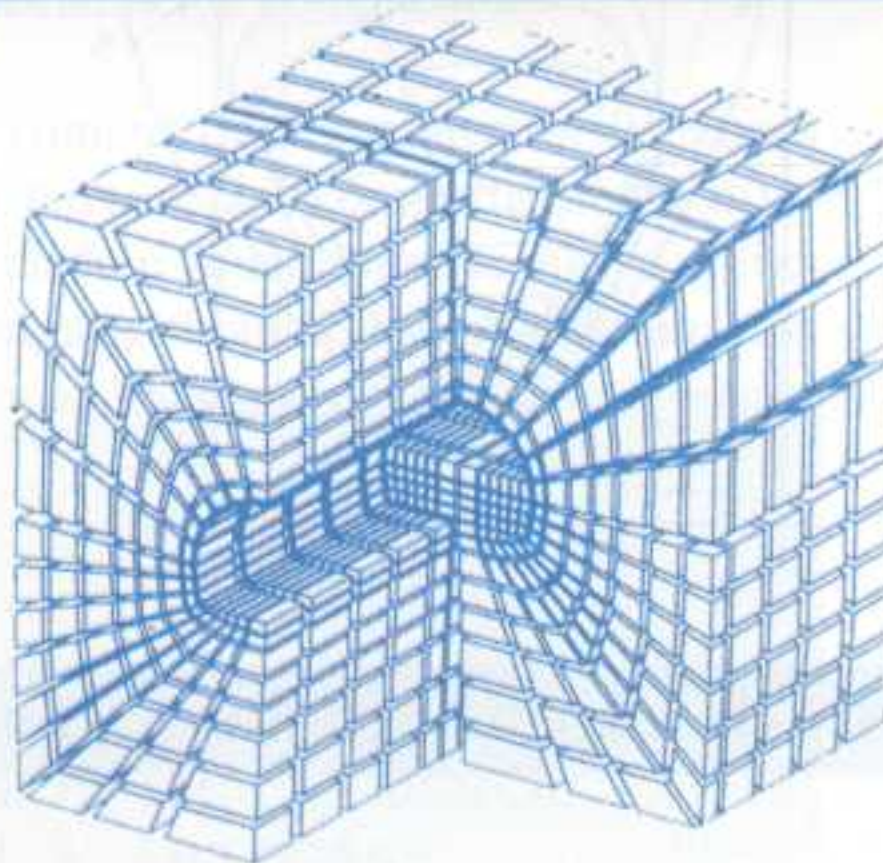
Los datos recogidos de la instrumentación han sido la base de modelos teóricos desarrollados con el objetivo de interpretar la evolución de convergencias e identificar las presiones actuantes sobre el sostenimiento.

Por otro lado, en el análisis de estabilidad exterior e interior se han aplicado refinadas técnicas de cálculo numérico (Elementos Finitos, Elementos de Contorno, Teoría de Bloques, etc.).

Finalmente, se ha desarrollado una aplicación específica de Métodos de Fiabilidad. En ella se aborda, con un planteamiento avanzado, el problema de evaluación de la seguridad de la obra.

Con todo lo anterior se ha pretendido dar respuesta a las garantías de seguridad y adecuación resistente que una obra pública del alcance de los túneles de El Padrún comporta.

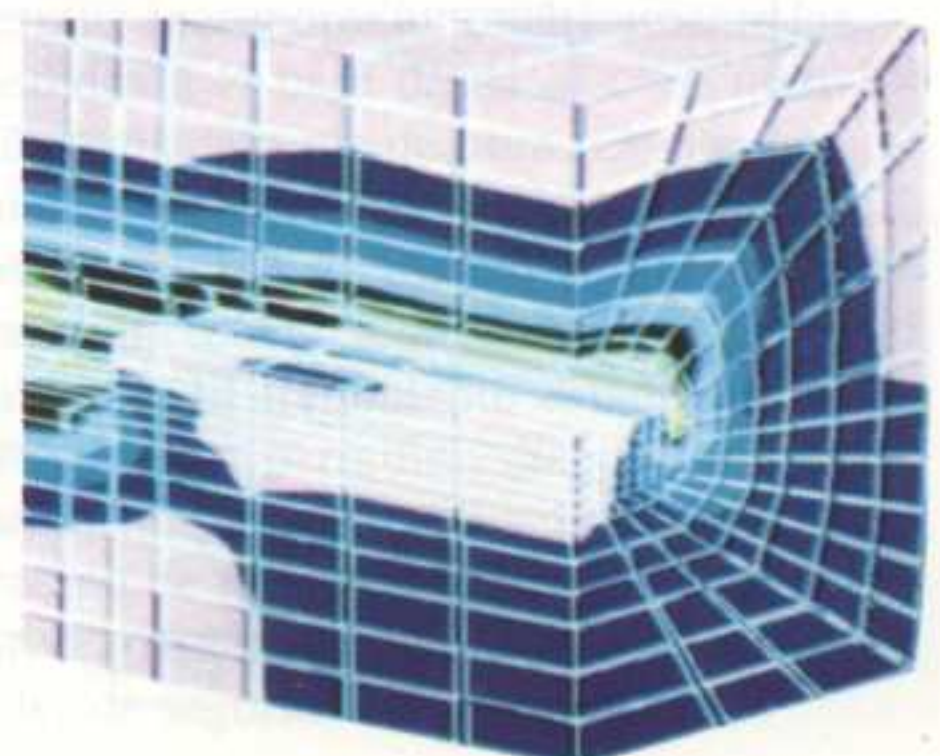
### Modelo tridimensional del túnel



Con las técnicas de Elementos Finitos en 3D es posible estudiar el sistema terreno-sostenimiento en situaciones derivadas del propio proceso de excavación como la confluencia de las etapas de avance y destroza. La figura representa una vista en perspectiva con sección a 1/4 de un modelo de estas características.

### Distribución de tensiones: Análisis 3D

El post-proceso gráfico es de gran utilidad para interpretar resultados de análisis. En este caso se estudia la distribución de tensiones producida por la confluencia de las dos fases de excavación del túnel en una sección no homogénea de terreno.





## Análisis de estabilidad exterior e interior

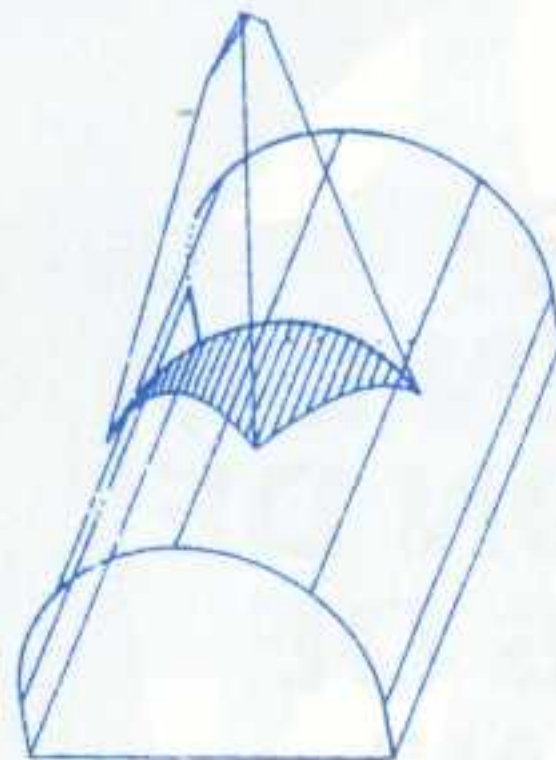
Los estudios de estabilidad del túnel, tanto exterior (taludes y boquillas) como interior, han supuesto un intenso esfuerzo de cálculo.

Para evaluar la estabilidad de las laderas de emboquillado se han empleado fundamentalmente procedimientos clásicos como el Método de Carter, aunque también se ha recurrido a refinadas técnicas de elementos finitos. Para fijar las propiedades del terreno se realizó una prospección sísmica. Los resultados de los estudios se utilizaron como apoyo en el diseño de protecciones y escolleras.

En las bocas y tramos iniciales del túnel se estudiaron las condiciones de caída potencial de bloques, tanto a efectos de anclaje como de sobrecargas sobre los paraguas de avance. Para ello se aplicó la Teoría de Bloques de Goodman-Shi. Como resultado se estableció el dimensionado (tamaño y densidad) del bulonaje necesario para garantizar el equilibrio.

En el análisis de estabilidad interior se han considerado distintas situaciones tanto de la fase final como durante la etapa de construcción. Se ha hecho una intensa aplicación de métodos sofisticados (Elementos Finitos lineales y no lineales, Elementos de Contorno, etc.), pero también se han empleado técnicas convencionales sobre todo en la realización de estudios paramétricos (Curvas Características, Teoría de Terzaghi, etc.).

## Ladera



En el proceso de perforación el emboquillado supone un punto singular que requiere especial atención. En el análisis riguroso del problema se recurre al cálculo no lineal con plasticidad no asociada. En la figura, análisis de la ladera en bocas Norte.

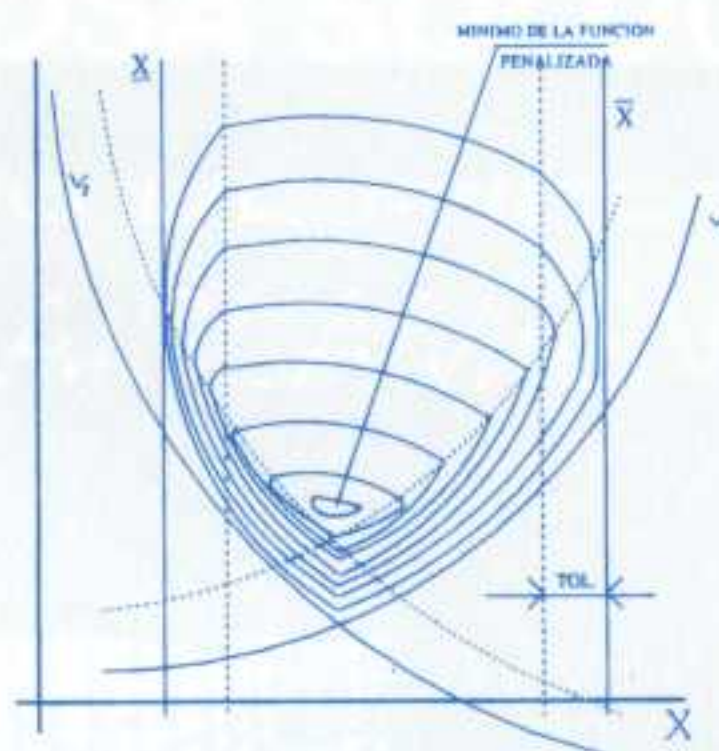
Los estudios de identificación de presiones han supuesto una tarea especialmente compleja debido al elevado número de variables que influyen en la interacción terreno-sostenimiento.

La estimación de la presión de interacción permite, por un lado, evaluar el estado del arco de terreno formado alrededor del túnel y, por otro, analizar los esfuerzos a que se encuentra sometido el sostenimiento.

Entre las diferentes líneas desarrolladas en el trabajo destaca la aplicación de métodos de Análisis de Sensibilidad y Optimización. Mediante ellos se consigue aproximar la distribución de presiones (función objetivo) a partir de variables tales como niveles de convergencia medidos, lecturas de células de presión y extensómetros de interior, etc.

La figura recoge el caso de los esfuerzos previstos en el sostenimiento en la transición entre las etapas de avance y destroza.

## Identificación de presiones



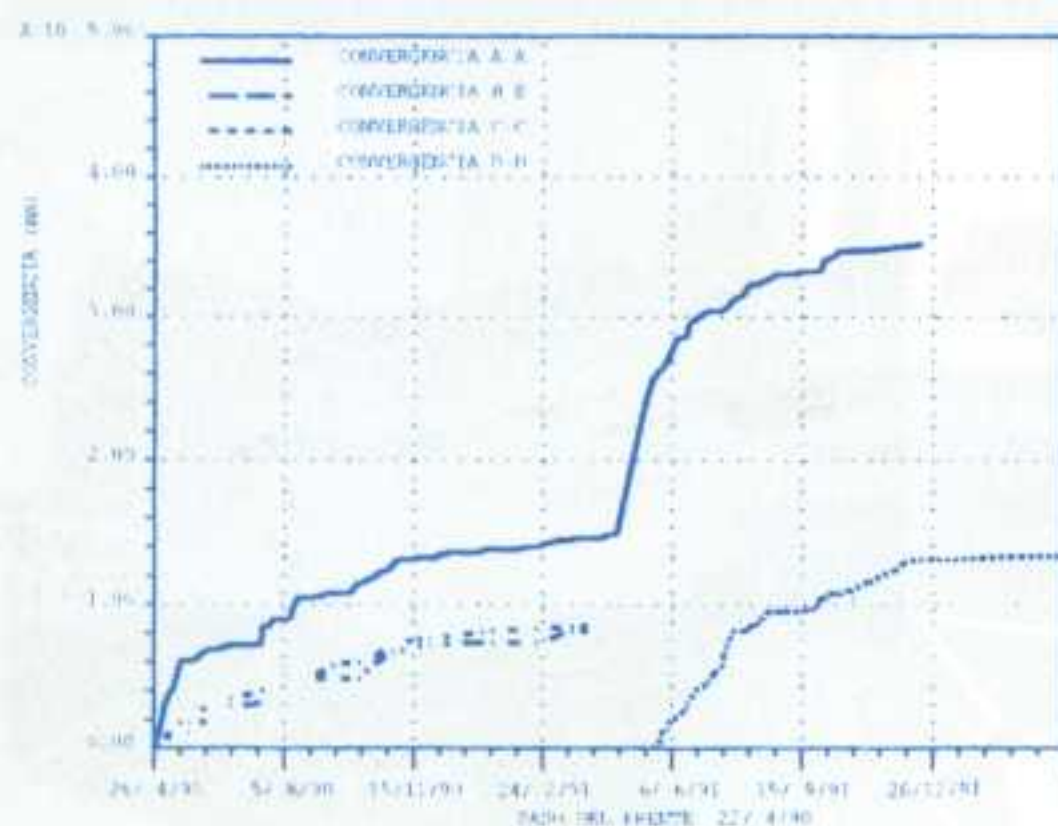
## Determinación de niveles de seguridad

La realización de estudios dentro de la Teoría de Estados Límite, y la introducción de la Teoría de Fiabilidad constituyen aportaciones originales dentro del trabajo realizado.

El objetivo de la Teoría de Fiabilidad consiste en cuantificar en términos de Probabilidad de Fallo la seguridad de una estructura. En este caso, para abordar la complejidad del problema se ha

## Ajuste de curvas de convergencia

La evolución de las convergencias constituye una de las medidas más abundantes y significativas para el control de la obra y la caracterización del sistema terreno-sostenimiento.



Se ha desarrollado un procedimiento numérico que permite realizar, a partir de las medidas disponibles, un ajuste teórico de las curvas de convergencia. El método se basa en un modelo viscoelástico del terreno y en la aplicación de una técnica de ajuste por mínimos cuadrados. Como resultado se obtiene información relativa a tiempos y cotas de estabilización, velocidades de evolución, etc.

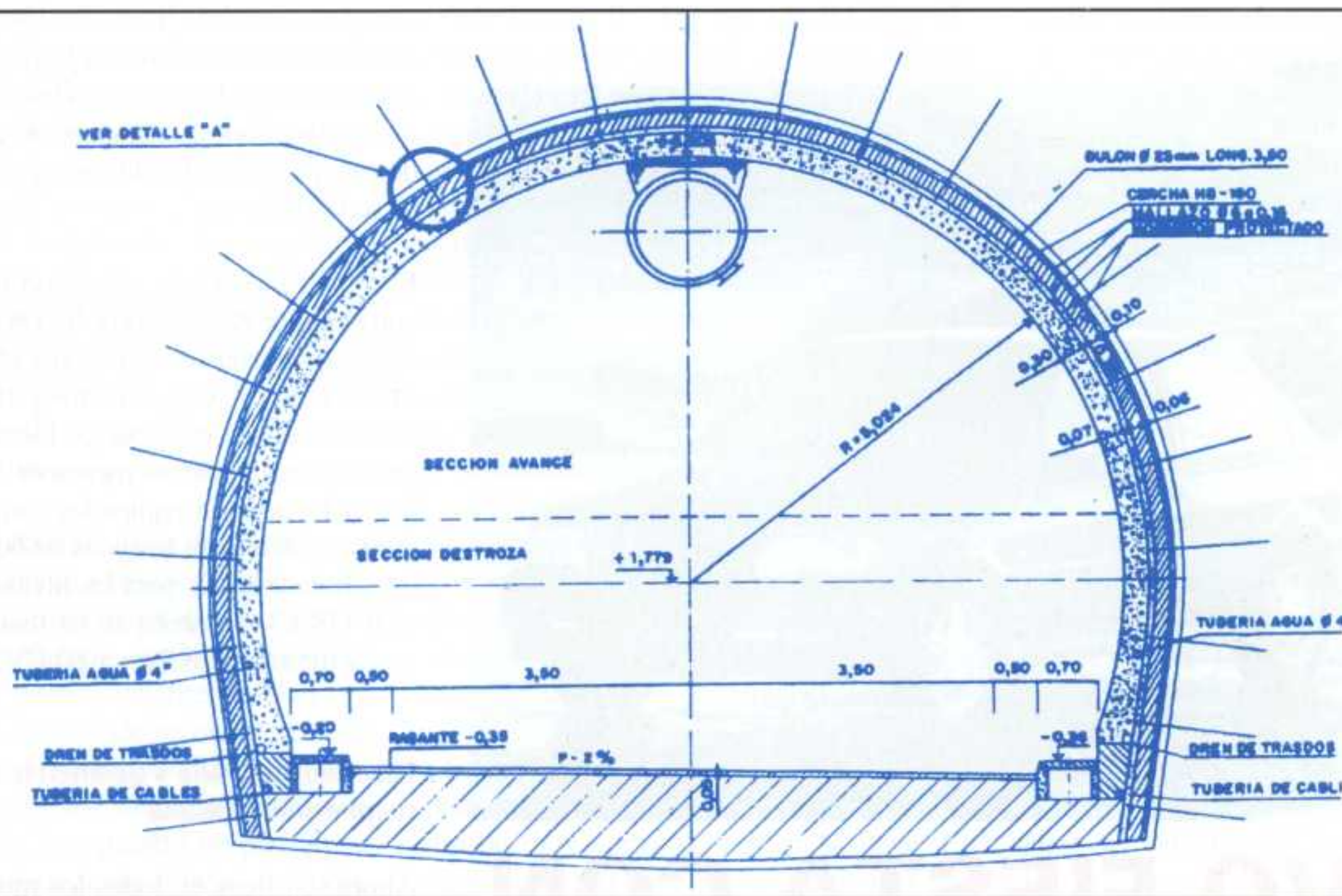
En la figura de la izquierda se recogen datos reales del PK=11,4125 en la calzada Mieres-Oviedo. A la derecha, se incluye un croquis del ajuste del modelo teórico.

## SISTEMAS DE COORDENADAS PARA LAS CONVERGENCIAS



Figura 2.2.2. Sistemas de coordenadas para las convergencias





desarrollado un esquema basado en el algoritmo de estimación puntual propuesto por Rosenbluth y en una definición de estados límite característicos del sistema terreno-sostenimiento.

## Instrumentación

Para asegurar el control y seguimiento de la obra se ha dispuesto una instrumentación muy completa. Con ello,

además de cumplir una finalidad admonitoria, imprescindible en la tecnología NATM, se pretende colaborar al incremento de la experiencia ingenieril en el sentido más puro del término: la extracción de conocimientos en situaciones especialmente complicadas.

Se comenzó por caracterizar las zonas del terreno con comportamiento diferenciado o aquellas en las que se preveía alguna singularidad. A continuación

se identificaron en ambos túneles zonas homólogas y se instrumentaron más fuertemente las secciones contenidas en el túnel que se perforaba en primer lugar, con lo que se adquiría experiencia para los trabajos en el segundo túnel.

Se han instrumentado nueve parejas de secciones mediante extensómetros interiores y de superficie, células de presión radiales y tangenciales, tanto en sostenimiento como en revestimiento, y se han recogido de forma sistemática medidas de convergencias.

Antes de su colocación los aparatos fueron sometidos a un riguroso proceso de calibrado y tras la puesta en obra se procedió a la comprobación, represurización, etc. de los mismos de acuerdo con su proceso minuciosamente establecido.

En lo posible, la toma de datos se ha realizado con medios electrónicos, lo que permite incorporar automáticamente las medidas a la base de datos computerizada situada a pie de obra. El mantenimiento y explotación de la base de datos ha exigido un trabajo continuado y sistemático tanto a pie de obra como en gabinete. El tratamiento estadístico de los datos ha permitido disponer de información de gran utilidad para la calibración de modelos teóricos y, en definitiva, para la determinación de los niveles de seguridad en las obras.



FUNDACION GENERAL DE LA  
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID  
**INSTITUTO DE AMPLIACION DE ESTUDIOS  
E INVESTIGACION "J. A. ARTIGAS"**

- ORGANIZACION Y COORDINACION DE CURSOS, CURSILLOS, CONFERENCIAS, ESTUDIOS POSTGRADO, ETC.
- ENLACES CON EMPRESAS PARA ESTUDIOS Y TRABAJOS PROFESIONALES.
- PUESTOS DE TRABAJO.
- PRACTICAS DE ALUMNOS EN EMPRESAS.
- ASESORAMIENTOS.

CON SEDE EN:  
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
C/. José Gutiérrez Abascal, 2 - Tfnos.: (91) 336 30 70/71 - Fax: (91) 336 30 11  
28026 MADRID